フェムト秒レーザによる、機能表面の加工

ヴィクター・マティリツキ、マティアス・ドンケ、サンドラ・ストロージ、クラウス・ハーティンガー

超高速レーザで、ガラス表面上に防曇表面が創成可能に

ハスの葉の驚くほどの撥水性に代表される、自然な超撥水性表面と超親水性表面の興味深い機能は、さまざまなバイオミメティック（生物系を模倣して画期的な高機能技術を生み出す）設計のインスピレーションになっている。撥水性表面と親水性表面の両方が、レーザ加工で創成可能であることが実証されている。

オーストリアにあるフォアアールベルク応用科学大（Vorarlberg University of Applied Sciences）のマイクロ技術研究センターは最近、米スペクトラ・フィジックス社（Spectra-Physics）と共同で、機能表面を創成するためのフェムト秒レーザに基づく加工プロセス「ClearSurface」を開発した。このプロセスに、産業用フェムト秒レーザ「Spirit」（**図1**）を組み合わせることによって、超親水性表面と超撥水性表面を高速かつフレキシブルに創成することができる。また、その濡れ性をさまざまな基板に適用し、レーザパラメータを調整することによって、接触角をきめ細かく制御することができる。

本稿では、フェムト秒レーザ加工によって生成された機能表面の潜在的用途の概要を示す。特に、霧水捕集効率と防曇性の高い表面を製造するためのフェムト秒レーザ加工の応用について、説明する。

バイオミメティックな霧水捕集表面

水不足は、すべての大陸で7億人を超える人々に影響を与える、大きな世界的問題の1つである[1]。興味深いことに、多くの乾燥地帯において、降水は主に露や霧の形で発生し[2]、その地域の動植物は、機能表面を備えるように進化することによって、その環境に適応している[3]。ゴミムシダマシは、ナミブ砂漠に生息するカブトムシの一種である。海岸線に沿って冷たいベンゲラ海流が流れるこの砂漠では、砂丘を覆う霧堤が定期的に発生する[4]。霧からの水を捕集するために、ゴミムシダマシは、霧を運ぶ風の方向に甲殻を傾けて[5]、鞘ばね上の親水性の突起に水滴を集める。水滴は大きくなると、重力で転がり落ち、撥水性のくぼみに導かれてゴミムシダマシの口に入る（**図2**）[6]、[7]。

本研究の目的は、高コントラストの濡れ性パターンをガラス上に作製することにより、ナミブ砂漠に生息するゴミムシダマシの鞘ばね（特定の昆虫が持つ硬い2枚の前翅のうちの1枚）を模倣し、その霧水捕集効率を評価することだった。この目的のために、フェムト秒レーザ微細加工と表面コーティングを組み合わせた「ClearSurface」加工プロセスを採用した。高コントラストの濡れ性微細パターンを持つ表面を、3つの加工ステップで創成した（**図3**）。

最初のステップでは、フェムト秒レーザによる微細構造作製によって、2段の高さからなる表面構造を生成した（図3a）。続いて、テフロンに似たコーティングを適用して、濡れ性状態を超親水性（接触角<10°）から超撥水性（接触角>150°、図3b）に変更した。最後に、選択的アブレーションを適用して、局所的に超親水状態を復元する（図3c）[7]。この表面を霧にさらすと、超親水

図1　スペクトラ・フィジックス社の産業用フェムト秒レーザ「Spirit One」。

性の部分に水滴がたまっていき、最後は超撥水性表面によってはじかれる（図3d）。

パイレックス（Pyrex）ウエハの表面に加工された、高コントラストの濡れ性パターンの霧水捕集効率を、未加工のパイレックスの霧水捕集効率と比較した。人工噴霧器を使った実験により、この微細パターンによって、霧水捕集効率が未加工ガラスと比べて60%近く高くなることが示された[7]。

上記の方法により、ガラスなどの繊細な基板を含む、幅広い材料表面の機能化が可能である。これは、特にバイオメディカルやマイクロ流体デバイスの分野において、霧水捕集表面の微細パターンの興味深い可能性を切り拓くものである。

高透過の防曇ガラス

ガラスの曇りは、広くよく知られた問題で、未だ解決策が探求されている。

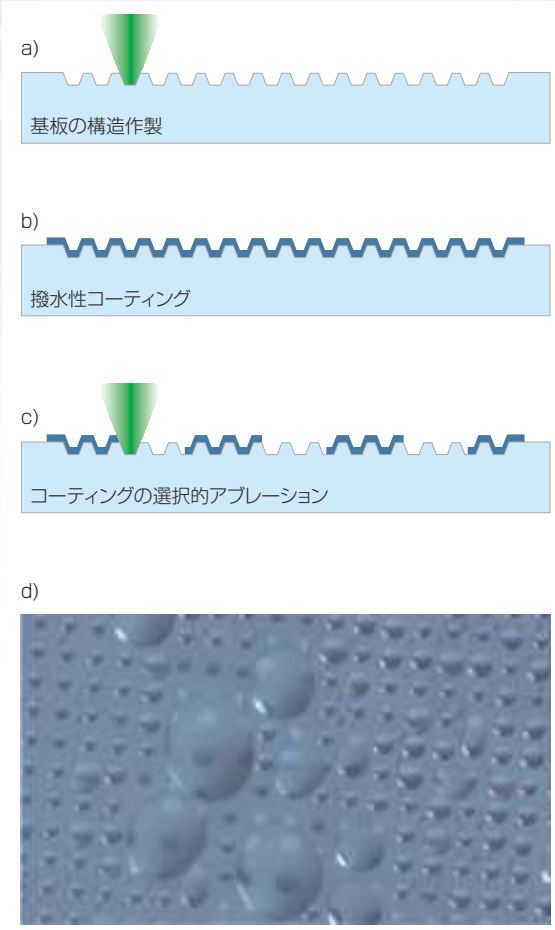

図3　超撥水性と超親水性の濡れ性が組み合わされた表面を生成するための加工ステップ。（a）フェムト秒レーザによる構造作製によって、超親水性の基板表面を生成する。（b）テフロンに似たポリマー層の堆積によって、表面を超撥水性状態に変更する。（c）コーティングの選択的アブレーションによって、超親水性基板を一部露出させる。（d）表面を霧にさらすと、超親水性の部分に水滴がたまっていき、最後は超撥水性表面によってはじかれる。

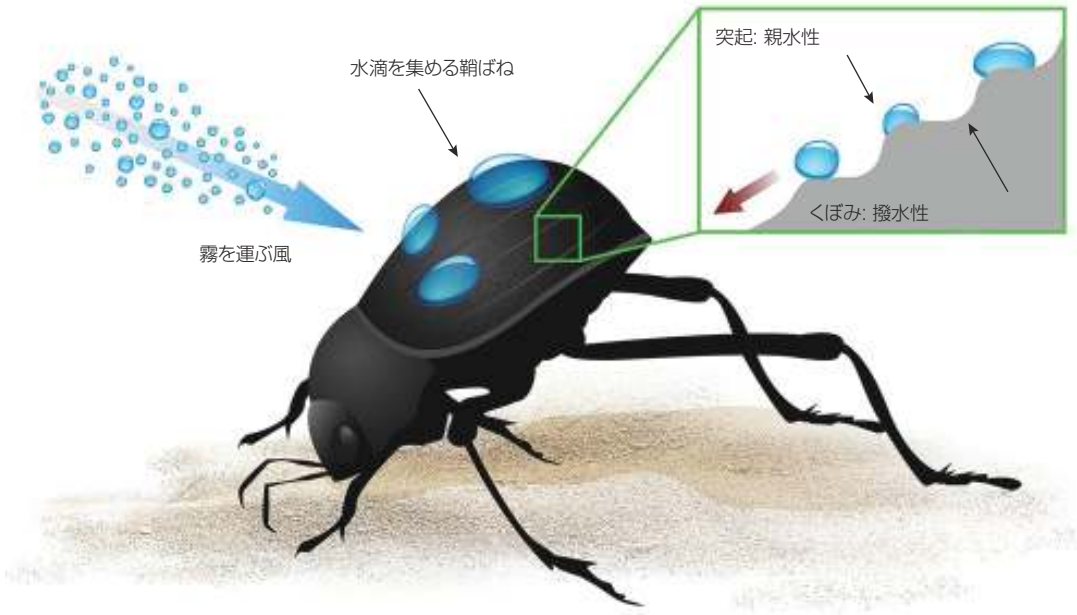

図2　ナミブ砂漠に生息するゴミムシダマシの霧水捕集の原理。霧を運ぶ風からの水滴が親水性の突起に集められ、一定の大きさに達すると、撥水性のくぼみを転がり落ちて、ゴミムシダマシの口に入る。

その状態は、湿度が高い環境で、物体の表面が周囲よりも冷たい場合に発生する。例えば、寒い屋外から暖かい室内に入ると、かけていた眼鏡が曇ることがある。また、ヘルメットバイザー、ダイビング用ゴーグル、一般的な自動車のミラーや窓でも、ガラス表面が曇る現象がみられる。

曇りは、表面上に水が小さな水滴状に凝集することによって生じる。水滴が透過光を拡散するために、ガラスを通した視界がぼやける現象が生じる（**図4**aと4b）。防曇表面は、光を拡散させる水滴の形成を防ぐものである。水滴が表面全体にわたって拡散するように、表面の濡れ性を改良することによって、このような表面が作成される（図4c）。課題としては、高い濡れ性と最小限の拡散を同時に達成する、ガラス表面の最適な形態を見つけることである。

レーザで構造作製した表面が、濡れた状態において光透過に与える影響を調査するために、半分をレーザで加工し、半分を未加工のままにしたガラスウエハを用意した。続いて、このガラスを脱イオン水蒸気にさらし、テスト構造の前に置いて写真を撮影した。**図5**には、「transparency」という単語が、濡れた未加工ガラスを通すとぼやけているのに対し、濡れた構造作製ガラスを通すとはっきり見えることを示している[8]。

この結果から、フェムト秒レーザによってガラス表面にパターンを生成することにより、高透過の防曇表面が創成可能であることが示された。濡れ性と透過性の両方を、パターンの形状や間隔によって制御することができた。ただし、対象用途に応じて、超親水性の濡れ挙動と視覚の間のトレードオフを最適化する必要がある。

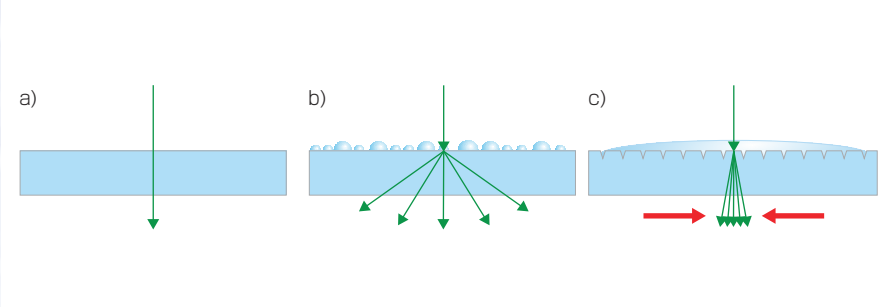

図4　乾燥したガラス表面（a）と霧を噴射したガラス表面（a）の光拡散の様子。防曇表面は超親水性の性質を持ち、表面上で霧滴を拡散させる（c）。その結果、（赤色の矢印で示されているように）濡れた状態における光拡散が低下する。

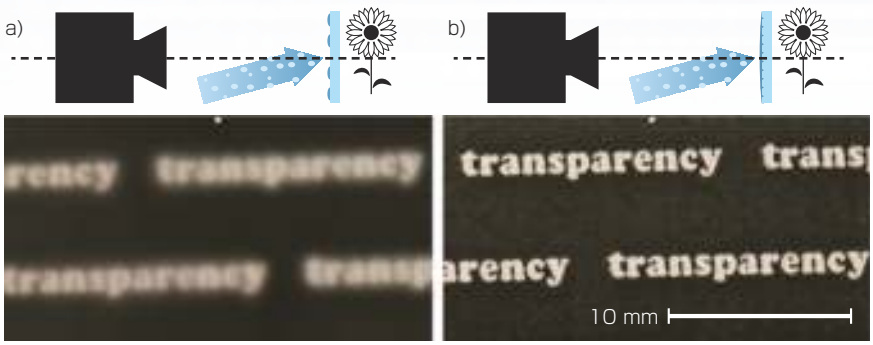

図5　濡れた状態の未加工ガラス（a）とレーザで創成した防曇ガラス（b）を通して見た、テキストページの視覚を示す。

謝辞

オーストリア科学研究経済省（Austrian Federal Ministry of Science, Research and Economy）と国立研究技術開発財団（National Foundation for Research, Technology and Development）による財政支援に心から感謝する。Spiritはスペクトラ・フィジックス社の登録商標、ClearSurfaceとSpirit Oneは同社の商標である。

参考文献

(1) See https://goo.gl/EcE57j.
(2) N. Middleton, Deserts: A Very Short Introduction, Oxford University Press (2009).
(3) F. T. Malik, R. M. Clement, D. T. Gethin, W. Krawszik, and A. R. Parker, Bioinspir. Biomim., 9, 1–15 (2014).
(4) H. A. Viles and A. S. Goudie, J. Arid Environ., 93, 20–29 (2013).
(5) T. Norgaard and M. Dacke, Front. Zool., 7, 23, 1–8 (2010).
(6) L. Zhai et al., Nano Lett., 6, 6, 1213–1217 (2006).
(7) E. Kostal, S. Stroj, S. Kasemann, V. Matylitsky, and M. Domke, Langmuir, 34, 9, 2933–2941 (2018).
(8) G. Sonderegger, "Fabrication of high-transparent anti-fogging glasses using fs-laser structuring," master thesis (2017).

著者紹介

ヴィクター・マティリツキ（VICTOR MATYLITSKY）とクラウス・ハーティンガー（KLAUS HARTINGER）は、米スペクトラ・フィジックス社（Spectra-Physics、米MKSインスツルメンツ社[MKS Instruments]傘下）所属でオーストリアに勤務。email: victor.matylitsky@spectra-physics.at URL: www.spectra-physics.com。マティアス・ドンケ（MATTHIAS DOMKE）とサンドラ・ストロージ（SANDRA STROJ）は、フォアアールベルク応用科学大（Vorarlberg University of Applied Sciences）マイクロ技術研究センター（Research Center for Microtechnology）の、超短パルスレーザによる材料加工に取り組むJosef Ressel Centerに所属。URL: www.fhv.at/en/research/microtechnology/josef-ressel-center

ILSJ